Romuald Marczyński

ZAGADNIENIA
NAUKOZNAWSTWA
2(22), 1970

Dzisiejsza maszyna cyfrowa

W artykule podano przegląd osiągnięć światowych w rozwoju maszyn cyfrowych. Opisano także maszynę CDC 7600, najszybszą spośród maszyn obecnie produkowanych na świecie. Omówiono najważniejsze pomysły, które zasadniczo wpłynęły na organizację istniejących maszyn cyfrowych oraz naszkicowano przewidywane cechy charakterystyczne maszyn lat siedemdziesiątych.

> Po czym ten [ślepiec], któremu zrobiono prezent z łba, odpowiedział: „Panie, słoń jest podobny do garnka", a ten, który oglądał tylko ucho, powiedział: „Słoń jest podobny do kosza w wialni.
> Wtedy zaczęli się kłócić
> *Udana*, część V, rozdz. IV

Omawianie maszyny cyfrowej przypomina oglądanie słonia przez ślepca z buddyjskiego opowiadania. Wszystko bowiem zależy zawsze od punktu widzenia obserwatora. A zatem opowiadanie o maszynie cyfrowej nie może dać słuchaczowi pełnego wyobrażenia. Dopiero długotrwałe korzystanie z niej przez użytkownika może sprawić, iż pozna on cały ogrom jej możliwości. W krótkim artykule można zaledwie pokazać „ucho, nogę czy kieł", natomiast cały „słoń", niestety, musi pozostać nieznany.

*

Znajdujemy się obecnie w połowie drogi między pierwowzorem maszyny cyfrowej, która była stosunkowo prostym aparatem do liczenia (chociaż z punktu widzenia mechaniki stanowiła skomplikowane urządzenie elektromechaniczne), a przyszłą maszyną, bardzo rozbudowaną i skomplikowaną — prawdopodobnie maszyną molekularną. Na drodze tej zmieniały się: realizacja techniczna, organizacja logiczna, sposób użytkowania i zakres zastosowań maszyny.

W artykule tym autor chciałby pokazać dzisiejszą maszynę cyfrową przede wszystkim od strony sprzętowej, przedstawić niektóre fragmenty historycznego rozwoju maszyn cyfrowych, ich stopniowe przekształcanie się z prymitywnego narzędzia do obecnego wysoce sprawnego urządzenia, wskazać, gdzie się dziś znajdujemy, nakreślić maszynę jutra, jednocześnie zaś zwrócić uwagę na możliwości, które maszyna cyfrowa dawała, daje i będzie dawać w przyszłości.

Celem artykułu jest także wykazanie, że użytkowanie sprzętu zbyt prymitywnego w odniesieniu do poziomu odpowiadającego danemu okresowi historycznemu powoduje hamowanie dalszego rozwoju i wytwarza niewłaściwe przyzwyczajenia, które następnie są przyczyną wielu bardzo groźnych następstw. Pracownik wyszkolony niewłaściwie powoduje bowiem straty znacznie trudniejsze do odrobienia niż pracownik o całkowitym braku wyszkolenia w danym kierunku.

Dzisiejsza maszyna cyfrowa jest wynikiem jej 30-letniego rozwoju. Zanim zajmiemy się opisem jej obecnych rozwiązań, jej możliwości oraz przyszłych kierunków jej rozwoju warto zastanowić się, jakie były źródła inspiracji konstruktorów i badaczy przy jej powstawaniu. Co spowodowało, że dopiero w latach czterdziestych naszego stulecia zbudowano nowoczesną maszynę matematyczną, chociaż możliwości techniczne ku temu istniały już wcześniej. Na to bowiem, czy dane urządzenie może powstać w danym okresie historycznym, mają wpływ dwa czynniki: 1) zapotrzebowanie społeczne na wynalazek oraz 2) istniejąca technologia.

Brak zapotrzebowania powoduje najczęściej brak osiągnięć. Przykładem są wynalazki Charles Babbage'a, które wyprzedziły o sto lat zapotrzebowanie i tyleż lat czekały na realizację.

Możliwości technologiczne budowy maszyn cyfrowych istniały — jak to już wspomniano — wprawdzie wcześniej, lecz trzeba było, aby potrzeby obliczeniowe, a mianowicie olbrzymie trudności w biurach obliczeniowych w czasie II wojny światowej, spowodowały powstanie warunków, które przyczyniły się do zbudowania tych maszyn.

Przekaźnik elektryczny został bowiem wynaleziony przez Henry'ego w 1835 r., lampa elektronowa przez Fleminga w 1905 r., a Lee de Forest stworzył prototyp lampy trójelektrodowej już w 1907 r. Jednak mimo tych wynalazków, które stworzyły techniczne możliwości budowy maszyn cyfrowych, do chwili zbudowania maszyny cyfrowej upłynęło kilkadziesiąt lat. Natomiast, jak to wynika z zestawienia podanego w tabeli 1,

Tabela 1

Opóźnienie w stosowaniu nowych technik do budowy maszyn cyfrowych

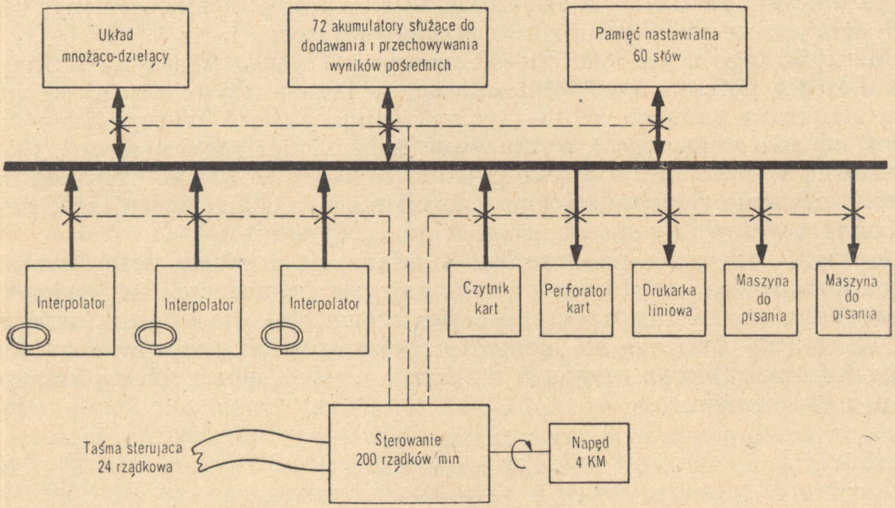
Rodzaj wynalazku	Data wynalazku	Rok zastosowania w budowie maszyn cyfrowych	Opóźnienie w latach
Przekaźnik elektryczny	1835	1939	96
Lampa elektronowa	1907	1946	40
Tranzystor	1946	1957	11
Układy scalone	1960	1964	4
Bąbelki magnetyczne	1969	?	?

opóźnienia występujące w zastosowaniu nowych technik do maszyn cyfrowych wobec rosnącego na nie zapotrzebowania coraz bardziej maleją. Tymczasem niektóre techniki i urządzenia — mimo wielkich pierwotnie nadziei, jakie w nich pokładano — nie znalazły do dziś praktycznego zastosowania. Przykładowo można tu wymienić kriotrony, parametrony czy diody tunelowe.

Rozwój maszyn cyfrowych można scharakteryzować kilkoma przykładami zrealizowanych maszyn cyfrowych, a mianowicie: maszyną MARK I (pierwsza maszyna, która praktycznie liczyła), maszyną LARC (mniej więcej z połowy omawianego okresu) oraz maszyną CDC 7600 (obecnie najszybszą).

Maszyna MARK I zbudowana w latach 1939—1944 była pierwszą dużą maszyną liczącą. Budowana była wspólnie przez Uniwersytet Harvard

i firmę IBM. Składała się z typowych elementów używanych do maszyn analitycznych, takich jak przekaźniki, liczniki mechaniczne, łącza i całe zespoły maszyn analitycznych, czytniki kart, drukarki. Była to maszyna elektromechaniczna, głównym jej źródłem napędowym był silnik o mocy 3 KW. MARK I składała się z pewnej liczby szaf o całkowitej długości 15 m i wysokości 2,4 m.



Rys. 1. Schemat blokowy maszyny MARK I

Jak widać na schemacie blokowym maszyny MARK I (rys. 1), składała się ona z niezależnych zespołów, które mogły wykonywać tylko ściśle określone operacje. Wszystkie zespoły były połączone wspólną szyną, przez którą przesyłano informacje z jednego zespołu do drugiego. Sterowanie maszyny odbywało się z 24-dziurkowanej taśmy papierowej, na której zakodowano kolejne czynności maszyny. Odpowiednie urządzenie sterujące dekodowało te informacje i według nich łączyło i uruchamiało poszczególne zespoły. Szybkość czytania taśmy wynosiła 200 rządków na minutę. Maszyna liczyła w systemie dziesiętnym na liczbach 23-cyfrowych. Do generacji takich funkcji, jak sinus, log itp., służyły interpolatory. Funkcje te były podawane do nich w postaci informacji wydziurkowanej na taśmach papierowych. Szybkość maszyny wynosiła 3 dodawania na 1 sek., 1 mnożenie w ciągu 5,7 sek., i 1 dzielenie w ciągu 15,3 sek. Generacja jednej wartości, np. dla sinusa, trwała 1 min. Według dzisiejszych pojęć maszyna ta nie była właściwie wyposażona w pamięć, lecz miała tylko bardzo małą pamięć stałą, którą można było ręcznie nastawiać, oraz rejestry służące do przechowywania wyników pośrednich.

Maszyna MARK I nie miała możliwości zmiany podczas pracy swego sztywnego programu i stanowiła klasyczny przykład przeniesienia pracy normalnego procesu biura obliczeniowego na urządzenia techniczne.

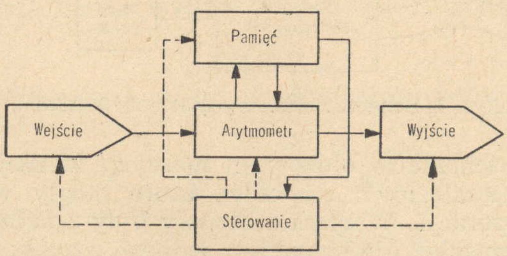
ENIAC, pierwsza elektroniczna maszyna cyfrowa, miała strukturę bardzo podobną do maszyny MARK I. W pierwszych latach pracy była ona też maszyną o programie sztywnym. Główna różnica między nią a maszyną MARK I dotyczyła szybkości. ENIAC wykonywał 5000 dodawań liczb 10-cyfrowych na 1 sek., 400 mnożeń na 1 sek. oraz 200 dzie-

leń na 1 sek. Warto dodać, że ENIAC została w późniejszym czasie przerobiona na maszynę z pamiętanym programem.

Decydującym czynnikiem, który zaważył na dalszym rozwoju maszyn cyfrowych, był pomysł polegający na jednorodnym — z punktu widzenia pamięci — traktowaniu rozkazów i danych. Pomysł ten przekształcił w jednej chwili narzędzie specjalistyczne, jakim były wszystkie pierwsze maszyny (MARK I, MARK II, ENIAC, IBM, CPC) niezależnie od ich różnej technicznej realizacji, w narzędzie uniwersalne o możliwościach, z których dziś jeszcze nie w pełni zdajemy sobie sprawę.

Maszyna tego typu różni się od maszyny Turinga (maszyny zaproponowanej dla potrzeb teorii obliczalności w latach trzydziestych) jedynie inną strukturą pamięci. W maszynie Turinga pamięć tworzy taśma, na której można zapisywać i wymazywać informacje, i którą można tylko przesuwać w lewo lub w prawo o jeden zapis. W maszynie cyfrowej natomiast czytanie zapisów informacyjnych nie ma takich ograniczeń, można bowiem w dowolny sposób „skakać" po całej pamięci.

Maszyna pokazana na rysunku 2 składa się z pięciu zespołów: pamięci (urządzenia, w którym przechowuje się informacje), arytmometru (urządzenia, w którym przekształca się informacje), sterowania (urządzenia, w którym przełącza się elementy maszyny według wprowadzonej do niego informacji) oraz urządzeń wejścia i wyjścia służących do komunikacji z otoczeniem.



Rys. 2. Schemat blokowy prostej maszyny cyfrowej

Na ogół biorąc, w pierwszych maszynach tego typu klasa przekształceń informacji dokonywanych w ramach jednej operacji, zwanej rozkazem, była znacznie uboższa niż w maszynach wcześniejszych. W niektórych bardzo prymitywnych maszynach tego typu sprowadzała się do dodawania i prostych przesyłań informacji między poszczególnymi elementami urządzenia. Maszynę tę nazwano maszyną cyfrową z pamiętanym programem w odróżnieniu od maszyn poprzednich, w których program w postaci fizycznej (np. w postaci ustawionych przełączników, tablic połączeń czy dziurek na taśmach lub kartach dziurkowanych) był przygotowywany przez człowieka (maszyna o programie zewnętrznym), wskutek czego człowiek w tamtych maszynach musiał występować jako ogniwo wykonawcze prowadzonego obliczenia.

Teoretycznie biorąc, najbardziej prymitywna maszyna cyfrowa o programie pamiętanym pozwala zrealizować dowolne zadanie z przetwarzania informacji przy założeniu jej odpowiednio dużej pamięci oraz odpowiednio dużej szybkości lub dowolnie długiego czasu będącego do dyspozycji. Wystarczy tylko napisać odpowiedni program — przepis na kolejność operacji — aby można było zrealizować zadanie dowolnie skomplikowane. Niestety, w praktyce wystąpiły ograniczenia zarówno ze wzglę-

du na parametry techniczne (szybkość, pojemność pamięci, niezawodność), jak i ze względu na charakter obsługi. Nie można w prosty sposób i w ograniczonym czasie napisać odpowiedniego programu w całości, rozkaz po rozkazie. Przy pisaniu programów występują błędy, a wystarcza jeden błąd, aby cały program był bezużyteczny. Szybko przekonano się, że pisanie programów rozkaz po rozkazie, za każdym razem od początku, jest barierą, która uniemożliwia dalszy postęp.

Pierwszą maszyną na świecie będącą realizacją pomysłu maszyny z pamiętanym programem był EDSAC — maszyna zbudowana w Cambridge w Wielkiej Brytanii. Maszyny tego typu, mimo ich prymitywnej struktury buduje się nadal. Przykładem jest ciesząca się do dziś wielkim powodzeniem na świecie maszyna PDP 8.

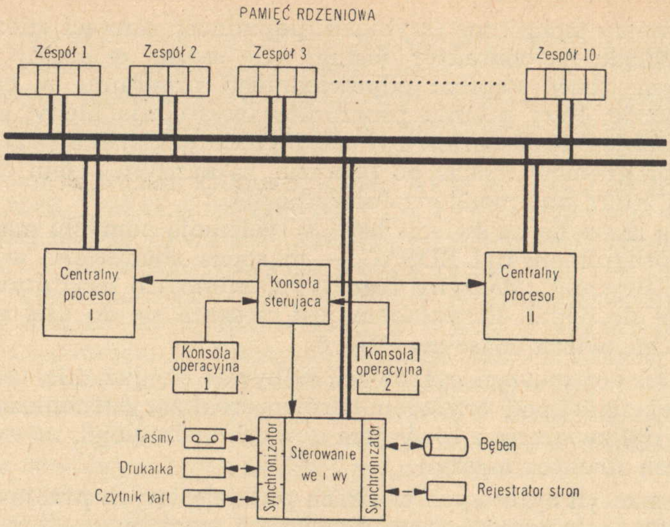
Dalszy rozwój maszyn cyfrowych odbywał się już nie tak skokowo, lecz bardziej ciągle, pod względem zarówno realizacji technicznej jak i zastosowań, i był związany z rozwojem nowych technologii, nowych elementów i nowych struktur maszyn.

Rozwój maszyn cyfrowych w latach pięćdziesiątych przejawił się przede wszystkim w rozwoju oprogramowania i języków programowania. Za początek burzliwego rozwoju oprogramowania można uważać pierwsze biblioteki podprogramów. Biblioteki te były zorganizowane w ten sposób, że podprogramy można było w nich odnaleźć przez podanie odpowiednich kodów — zwykle nazwy programu. Biblioteki te miały istotne znaczenie w rozwoju techniki tzw. makrorozkazów (uporządkowanych prostych zbiorów rozkazów maszynowych o wspólnej nazwie). Po latach makrorozkazy przekształciły się w procedury, a następnie w języki procedur. Pierwsze języki programowania, znane jako interpretatory, pojawiły się w latach 1952—1953. Technika interpretacyjna umożliwiała budowę bardzo prostych języków programowania, często określanych jako języki symboliczne maszynowo zorientowane. Zwykle programy wynikowe były programami jeden-do-jeden w stosunku do rozkazów maszyny. Interpretatory realizując proste języki programowania przekształcały poszczególne rozkazy programu na operacje maszynowe korzystając do tego celu z podprogramów. Czynność tę wykonywało się za każdorazową realizacją poszczególnego rozkazu językowego, wskutek czego interpretatory były nieefektywne.

Od roku 1956 datuje się zanik interpretatorów. Na ich miejsce pojawiły się kompilatory, które mogły translować języki procedurowo zorientowane, a których programy wynikowe nie miały powyższej niedogodności. W tym czasie powstają pierwsze języki algorytmiczne. Opisy tych języków wykazywały małe podobieństwo do późniejszego formalizmu języków programowania. Dopiero po roku 1958, a zwłaszcza od 1961, zastosowano do badania języków metody analizy syntaktycznej. Wówczas to rozpowszechniły się języki szeroko obecnie znane, jak FORTRAN, ALGOL, COBOL.

*

Niezależnie od rozwoju metod oprogramowania i samego programowania maszyn cyfrowych rozwijały się struktury maszyn. Przykładowo zostanie omówiona struktura jednej z pierwszych maszyn o bardzo złożonej strukturze, maszyny LARC (Lawrence Automatic Research Computer) zbudowanej w latach 1956—1960 przez firmę Univac. Jej schemat blokowy jest przedstawiony na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat blokowy maszyny LARC

LARC składa się z jednego procesora centralnego lub dwu procesorów centralnych (*PC*) zespołu sterowania wejściowo-wyjściowego (multipleksora) (*SWW*), zespołu sterowania urządzeniami peryferyjnymi. Wszystkie powyższe bloki mają bezpośredni dostęp do wieloczłonowej pamięci rdzeniowej. Maszyna pracuje w układzie dziesiętnym.

Pamięć maszyny składa się z niezależnych zespołów, każdy o pojemności 2500 słów 12-cyfrowych dziesiętnych (60 bitów). Zespoły mają własne niezależne elektroniczne układy. Podział pamięci na zespoły niezależne umożliwia jednocześnie zwracanie się do pamięci: przez PC w celu pobrania rozkazów i danych, przez SWW po swoje rozkazy dla przesyłania danych do i z pamięci, przez zespół sterowania *WW*. Chociaż czas dostępu do zespołów indywidualnych wynosi 4 μs., efektywny czas dostępu systemu ze względu na zakładkową pracę zespołów pamięci wynosi 1/2 μs.

Aby umożliwić jednoczesną komunikację między *SWW*, *PC* i wieloma zespołami pamięci rdzeniowej, zastosowano system (multipleksowy) „okienek" czasowych. Wzajemna komunikacja między wszystkimi zespołami dokonywana jest poprzez szyny zbiorcze, które są rozdzielane w czasie między zespołami. Cykl podziału wynosi 4 μs i jest rozbity na okienka czasowe 1/2 μs. Podczas każdego okienka czasowego można przesłać równolegle jedno słowo lub rozkaz do lub z pamięci. Każdy zespół pamięci rdzeniowej może zapoczątkować swój cykl co 4 μs w każdym z okienek. Po zainicjowaniu pracy odpowiednie blokady uniemożliwiają dostęp do czynnych urządzeń. Celem zapewnienia ciągłego przesyłania danych wejściowo-wyjściowych każdy zespół pamięci jest wyposażony w układ priorytetu. Układ ten gwarantuje dostęp po zaadresowaniu do każdego zespołu pamięciowego w czasie 4 μs. Metoda okienek czasowych (segmentacji) jest bardzo efektywna dla komunikacji i w systemach wieloprocesowych oraz wielopamięciowych i stanowi istotną cechę maszyn tzw. czwartej generacji.

LARC ma cztery poziomy pamięci, różniące się szybkościami i kosztami na znak. Poziom pierwszy pracuje z cyklem 1 μs. Składa się on z pewnej liczby rejestrów, z których można korzystać jako z rejestrów

akumulatora (A) dla przechowywania operandów i wyników lub też jako z rejestrów (B) dla przechowywania stałych używanych w operacji adresowania. W każdym PC jest 99 rejestrów 1 μs. Podobne rejestry są użyte jako bufory w każdej jednostce sterowania. Poziom drugi pamięci to pamięć ferytowa. Poziom trzeci — to pamięć masowa na bębnach.

Do maszyny można dołączyć 24 jednostki pamięci bębnowej. Każdy bęben ma pojemność 250 000 słów 12-cyfrowych. W celu jednoczesnego zapisu i czytania zastosowano trzy zespoły czytania i dwa zespoły zapisu. Program w *SWW* steruje przyłączenie każdego bębna do zespołu sterującego. Jeden zespół sterujący obsługuje na przemian dwa bębny i przesyła 330 000 cyfr dziesiętnych na sekundę.

Procesor centralny zaprojektowano tak, aby mógł on wykonywać wiele rozkazów jednocześnie. Podczas gdy wykonuje się jeden rozkaz, argument rozkazu następnego jest przesyłany z lub do pamięci, równocześnie zaś generuje się adres argumentu trzeciego rozkazu, a rozkaz czwarty jest pobierany z pamięci. Wynikiem tego jest fakt, że podczas pracy ciągłej średni czas wykonywania rozkazu wynosi 4 μs, chociaż każdy z rozkazów przebywa w części sterowania procesora centralnego przez czas dłuższy.

O operacjach *We—Wy* (wejście—wyjście) decyduje program w *PC*. Tworzy on pakiet programu dla *We—Wy*, który zapamiętany jest w pamięci. Następnie *PC* podaje do *SWW* miejsce pakietu *We—Wy*. *SWW* w celu określenia typu operacji bada ten pakiet i wysyła do właściwych urządzeń *We—Wy* program manipulacyjny. Program ten w razie potrzeby ustawia urządzenia w kolejkę, przekształca pakiet do rozkazów maszyny, wykonuje operacje *We—Wy*, bada, czy nie ma jakichś błędów, w razie potrzeby regeneruje go, przerywa pracę *PC* itp.

Program wykonywany w *SWW* można uważać za prototyp części nowoczesnego systemu operacyjnego. Wyższość programu *SWW* nad nowoczesnymi programami realizowanymi w sprzęcie objawia się znacznie większą sprawnością wskutek równoległej pracy *SWW* i *PC*.

Maszyna LARC była jedną z pierwszych dużych maszyn tranzystorowych. Wiele stosowanych w niej rozwiązań można jeszcze znaleźć w maszynach obecnie produkowanych lub projektowanych. Warto dodać, że z dwu sztuk wyprodukowanych jedna jeszcze pracuje, druga zaś (a właściwie pierwsza) została wycofana z pracy rok temu, aby ustąpić miejsca maszynie CDC 7600.

Na dalszym rozwoju maszyn cyfrowych zaważyły szczególnie dwa pomysły: pióro świetlne (możliwości komunikacji graficznej maszyny z człowiekiem) i podział czasu.

Pomysł maszyny z podziałem czasu powstał na przełomie lat 1950—1960, problem zaś bezpośredniej komunikacji człowiek—maszyna w taki sposób, że tworzą jeden zespół, sięga początków rozwoju maszyn. Wystąpił on już przy pierwszej elektronicznej maszynie matematycznej ENIAC. Początkowo był on raczej zagadnieniem drugoplanowym, co było spowodowane, między innymi, czynnikami ekonomicznymi. Duże maszyny cyfrowe są bardzo drogie i istnieje duży nacisk, aby były wykorzystywane w stu procentach. Człowiek zaś w porównaniu z maszyną działa wolno, co powoduje, że przy bezpośredniej pracy z maszyną reakcje jego (lub raczej brak ich) hamują pracę maszyny. Zagadnienie to mogło zostać sensownie rozwiązane właśnie z chwilą zbudowania maszyn mikroprogramowanych z podziałem czasu.

Kamieniem milowym na drodze rozwoju komunikacji człowiek—maszyna był projekt systemu SAGE (Semi Automatic Ground Environment

System for Air Defense), który powstał już w 1952 r. Ponieważ w zagadnieniach militarnych problemy ekonomiczne odgrywają znacznie mniejszą rolę, przy projekcie tym rozwinięto szeroko specjalne urządzenia wejścia i wyjścia. Zostały opracowane pulpity z wyjściem i wejściem obrazowym (na ekranach lamp oscyloskopowych), na których informacje mogły być wyświetlane w postaci świetlnych rysunków, cyfr i liter, oraz opracowano pióro świetlne, które umożliwiało rysowanie na tych ekranach.

W latach 1961—1962 został opracowany (przez Sutherlanda) w MIT (Massachusetts Institute of Technology, Stany Zjednoczone) system, który spowodował przełom w komunikacji człowiek—maszyna. Na maszynie TX-2, przy wykorzystaniu ekranu „telewizyjnego" i pióra świetlnego (którego koncepcję rozwinięto w projekcie SAGE), został opracowany system zwany szkicownikiem, umożliwiający rysowanie schematów i rysunków na ekranie. Została opracowana pewna liczba zasad konstruowania tych rysunków, przy czym wybrano je w sposób, aby można było rysować dość skomplikowane struktury. Całość systemu polega na opracowaniu całego zbioru programów, które potrafią na bieżąco interpretować zapisy pióra świetlnego na ekranie i w zależności od żądań operatora odpowiednio się przekształcać. System ten pracuje z podziałem czasu między programem wprowadzającym informacje na ekran i z ekranu, a programem prowadzącym przetwarzanie informacji dla przekształcania obrazu.

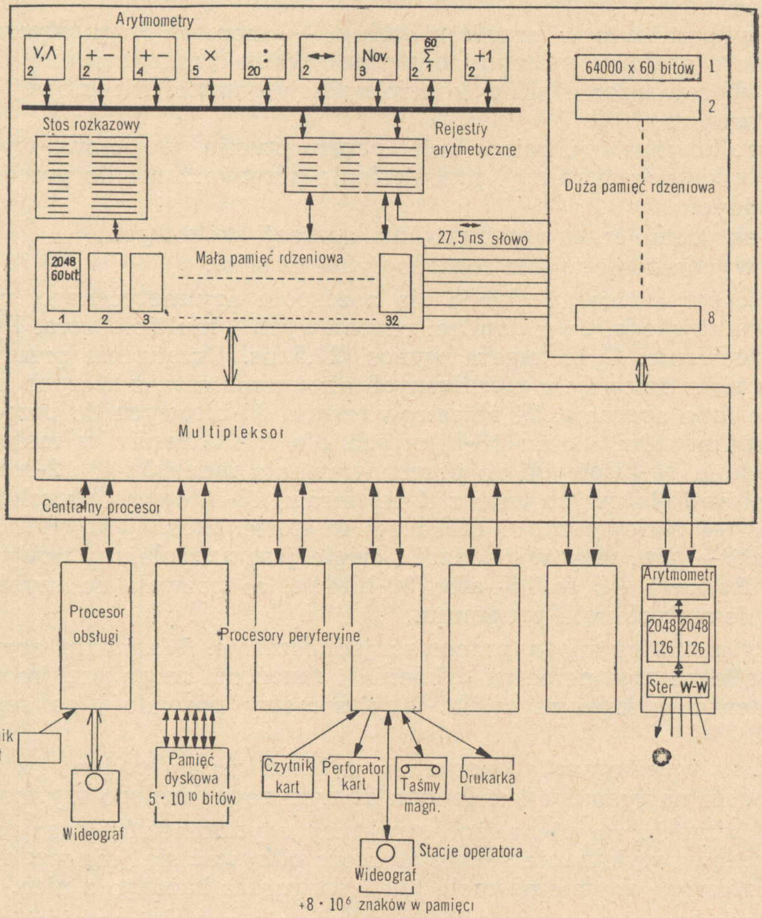
Pomysł drugi — podział czasu — oprócz dużego usprawnienia niektórych procesów pracy, np. umożliwienia jednoczesnego prowadzenia obliczeń i uruchamiania innego programu krok po kroku, otworzył erę systemów wielomaszynowych i wielodostępnych. Wynalazek ten łączy się z jeszcze jednym udoskonaleniem maszyn, a właściwie systemów cyfrowych, mianowicie pracy w czasie rzeczywistym, czyli na bieżąco, co oznacza, że obliczenia wykonywane są tak szybko, jak szybko przebiega proces, który obliczamy. Pierwszym systemem pracującym w podobny sposób, który znalazł szerokie zastosowanie, był system SABRE — system rezerwacji miejsc towarzystwa lotniczego American Airlines. Zamawianie miejsc odbywa się przypadkowo, obciążając system w sposób nierównomierny sporą ilością różnorodnych żądań. System jest w stanie odpowiedzieć na zapytanie w ciągu trzech sekund, przy czym należy pamiętać, że końcówki systemu są rozmieszczone na obszarze całej Ameryki.

*

Najszybszą na świecie produkowaną fabrycznie maszyną cyfrową jest obecnie system maszynowy CDC 7600. System ten został dostarczony w styczniu 1969 r. do Lawrence Radiation Laboratory w Livermore, gdzie zastąpił maszynę LARC wycofaną z użytkowania w grudniu 1968 r. Teoretyczną szybkość tej maszyny wynoszącą 36 mln op/s uzyskano przez równoległą i segmentową organizację. Ponieważ badania przedsiębiorstwa wykazały, że zastosowanie elementów dyskretnych zamiast układów scalonych pozwala na uzyskanie przy takich samych kosztach maszyny szybszej, wobec tego maszynę zbudowano na elementach dyskretnych. Maszyna ta jest znacznym ulepszeniem maszyny CDC 6600, tj. poprzedniej maszyny tej firmy. Lepsze parametry uzyskano z jednej strony przez skrócenie podstawowego cyklu zegara z 100 do 27,5 ns, a z drugiej — przez odpowiednie wykorzystanie funkcji centralnego procesora, co umożliwiło

jednoczesne wykonywanie kilku rozkazów oraz rozbudowę struktury systemu wejścia i wyjścia, a także staranne dopasowanie szybkości poszczególnych urządzeń.

Maszyna, której schemat blokowy jest podany na rysunku 4, składa się z procesora centralnego *PC*, sześciu procesorów peryferyjnych *PP*, systemu dyskowego, procesora obsługi z wyposażeniem, stacji operacyjnej, czytnika kart, dziurkarki kart, dwu drukarek wierszowych, dwu przewijaczy taśmy magnetycznej. Koszt maszyny dla powyższej minimalnej konfiguracji wynosi 8 250 000 dol. Istnieje możliwość rozbudowania systemu dodatkowymi procesorami peryferyjnymi (do 15), a także dodatkowymi dyskami, bębnami i innymi urządzeniami peryferyjnymi.



Rys. 4. Schemat blokowy maszyny CDC 7600.

System CDC 7600 jest zorganizowany w postaci sieci stacji operatora, przy czym każda z nich jest wyposażona w konsole i urządzenia peryferyjne. Urządzenia te łączy się z systemem CDC 7600 poprzez procesory peryferyjne, które działają jako multipleksory z pamiętanym programem i służą do dostarczenia i pobierania danych z systemu.

Programy użytkowe mogą być wprowadzane z każdego stanowiska pracy. Każde stanowisko jest niezależne i pracuje równolegle z innymi stanowiskami. Użytkownik otrzymuje w efekcie wiele maszyn w jednym bloku. Procesy peryferyjne sterują strumieniami informacji przesyłanymi z i do procesora centralnego. Jako bufor między stanowiskami pracy a procesorem centralnym służy duża pamięć rdzeniowa procesora centralnego, która przechowuje informacje gotowe do wykonania przez program znajdujący się w małej pamięci *PC*.

Do najbardziej interesujących rozwiązań maszyn CDC 7600 należą:

1) organizacja strukturalna (mała—duża) pamięci procesora centralnego (na styku tych pamięci jest osiem rejestrów 480-bitowych);

2) zdolność segmentacji operacji (9 jednostek funkcjonalnych *PC* pracujących niezależnie);

3) wyposażenie w procesor obsługi — monitor diagnostyczny (który informuje o stanie maszyny bez przerywania przetwarzania);

4) wprowadzenie bitów kontrolnych w pamięci rdzeniowej i centralnej procesora;

5) całkowite wyeliminowanie przetwarzania wejściowo-wyjściowego przez procesor centralny i przeniesienie przetwarzania do procesorów peryferyjnych;

6) skrócenie czasu wykonywania operacji skokowych;

7) wyposażenie w stos rozkazowy na 12 słów.

Procesor centralny składa się z zespołu arytmetycznego, urządzenia przetwarzającego, dwu pamięci rdzeniowych i multipleksora. *PC* pracuje synchronicznie. Cykl zegara wynosi 27,5 ns. Urządzenie przetwarzające składa się z dziewięciu niezależnych arytmometrów, z których każdy wykonuje inne operacje, 24 rejestrów (ośmiu 60-bitowych do przechowywania argumentów, ośmiu 18-bitowych dla ich adresów w małej pamięci oraz ośmiu 18-bitowych do przechowywania indeksów) i 12-rozkazowego stosu słów 60-bitowych wraz z 12 rejestrami 18-bitowymi przechowującymi adresy tej małej pamięci rozkazów w stosie. Stos jest typu „pierwszy wchodzi — pierwszy wychodzi" i ciągle jest uzupełniany nowymi rozkazami. Rozkazy *PC* są 15- albo 30-bitowe, co pozwala na szybkie wykonywanie małych pętli programu.

Arytmometry mogą pracować jednocześnie. Wszystkie arytmometry z wyjątkiem arytmometru dzielenia i mnożenia mogą przyjmować nowe argumenty w każdym cyklu. Arytmometry pozwalają na segmentację pracy.

Czasy wykonywania operacji w cyklach zegara podano na schemacie blokowym na rysunku 4 w lewym dolnym rogu każdego arytmometru.

Ze względu na niezależne struktury arytmometrów oraz organizację segmentową wykonanie rozkazów może odbywać się jednocześnie zarówno w różnych arytmometrach, jak i wewnątrz każdego z nich.

Pamięć procesora centralnego składa się z małej pamięci rdzeniowej (*PM*) i dużej pamięci rdzeniowej (*DP*).

Mała pamięć typu koincydencyjnego składa się z 32 bloków po 2048 słów 60-bitowych każdy. Jej pojemność całkowita wynosi 65 536 słów. Poszczególne bloki są niezależne. Odpowiednia organizacja w stosy umożliwia uzyskanie czasu dodawania 27,5 ns dla słów 60-bitowych. Cykl: czytanie—zapis dla bloku wynosi 275 ns. Wszystkie bloki *PM* są dostępne jednocześnie. Takie warunki pracy mogą wystąpić przy kopiowaniu infor-

macji między małą a dużą pamięcią. Czas dostępu do bloku wynosi 4 cykle. Rozkazy *PC* i multipleksora są pobierane z małej pamięci. Dane *PC* mogą być pobierane zarówno z *PM*, jak i *DP*.

Duża pamięć typu liniowego składa się z 8 niezależnych bloków po 64 000 słów bitowych każdy. Pojemność całkowita wynosi 512 000 słów. Cykl: czytanie—zapis odpowiada 64 cyklom zegara — 1,76 μs. W celu uzyskania szybkości „jedno słowo na cykl zegara” pamięć jest wyposażona w 8 rejestrów 480-bitowych i zastosowano w niej przepisywanie blokowe (czasową zakładkę bloków). Dostęp do bloku jest możliwy co 8 cykli zegara, co umożliwia otrzymanie wymaganej szybkości przesyłania.

DP tworzy podstawową pamięć procesora centralnego, w której umieszczane są programy przygotowane do wykonania i zespoły danych.

Komunikacja między procesorem centralnym a każdym z procesorów peryferyjnych dokonuje się poprzez dwa dwukierunkowe kanały obsługiwane przez multipleksor. Przekształca on 60-bitowe słowa procesora centralnego na 12-bitowe słowa procesorów peryferyjnych, i odwrotnie. Maksymalnie można przyłączyć 15 procesorów peryferyjnych. Każdy z kanałów wyposażony jest w oddzielne bufory wejściowo-wyjściowe.

Obsługiwanie i wykonywanie operacji *We—Wy* dla procesora centralnego prowadzi sześć procesorów peryferyjnych, które funkcjonują jako komunikacyjne i informacyjne centrale przełączające między procesorem centralnym a urządzeniami peryferyjnymi. Każdy z procesorów peryferyjnych może pracować samodzielnie jako oddzielna maszyna cyfrowa. Procesor peryferyjny może znajdować się albo w tym samym pomieszczeniu albo w innym. Każdy z *PP* może wykonywać w tym samym czasie niezależne programy.

Każdy procesor peryferyjny składa się z trzech zespołów: arytmetycznego, pamięciowego i sterowania *We—Wy* dla urządzeń peryferyjnych. Zespół liczący *PP* jest zorganizowany konwencjonalnie. Pamięć składa się z dwu bloków, każdy po 2048 słów 12-bitowych o cyklu: czytanie—zapis wynoszącym 276 ns. W celu zwiększenia szybkości adresacja jest przemienna. Każdy blok jest wyposażony w dwa rejestry do przechowania adresów dla danych, które mają być pamiętane i jeden rejestr na dane czytane z obu bloków.

Sterowanie *We—Wy* funkcjonuje w podobny sposób, jak multipleksor *WW* procesora centralnego. Wyposażone jest w osiem 12-bitowych kanałów dwukierunkowych, dwu dla komunikacji z procesorem centralnym i sześciu dla urządzeń peryferyjnych.

Dwa z nich są przeznaczone dla obsługi modułu dysków o pojemności 8 mln znaków. Procesory te mogą obsłużyć jeszcze jeden moduł. Sześć *PP* tworzy jedną stację operatorską. Stacja operatorska w obecnym wykonaniu zawiera 1 dysk na $8 \cdot 10^6$ znaków, wideograf, czytnik kart, dziurkarkę kart, dwie dziurkarki i dwa przewijacze taśm.

*

Podstawową cechą dzisiejszej maszyny jest „systemowość”, tj. zdolność do pracy w systemach cyfrowych zaawansowanych.

Można wyróżnić następujące typy systemów eksploatacji maszyn cyfrowych:

prymitywne: biuro obliczeniowe
klasyczny (tradycyjny),
zaawansowane: wsadowy
„pytanie—odpowiedź”
konwersacyjny
uniwersalny.

Oczywiście, może być ponadto wiele odmian tych systemów, a niektóre z nich mogą pracować na bieżąco (w czasie rzeczywistym).

System prymitywny — biuro obliczeniowe, jest przykładem realizacji obliczeń na maszynie cyfrowej działającej tak, że brak w niej bezpośrednio związku między realizowanym algorytmem a wynikami. Istotnym elementem sterującym w tym systemie jest człowiek, który musi sam podejmować decyzje podczas wykonywania obliczeń.

System klasyczny jest to system, w którym maszyna cyfrowa jest użytkowana w sposób tradycjonalny. Operator nie jest elementem wykonywanego algorytmu przetwarzania, ale ma możność interweniowania zależnie od jego woli. Po wykonaniu jednego algorytmu wprowadza następny.

System wsadowy jest to system, w którym użytkownik nie ma dostępu do maszyny. Programy są ładowane do maszyny wsadami na taśmie w ustalonych godzinach, wyniki zaś są wprowadzane na taśmę w miarę ich powstawania. Dostęp użytkownika do wyników jest możliwy po wykonaniu całego wsadu.

System „pytanie—odpowiedź” jest to system, w którym maszyna w razie braku zapytań wykonuje pracę drugoplanową. Z pewnej liczby konsoli, najczęściej odległych od siebie, pytający ma bezpośredni dostęp do maszyny i może zadawać pewną liczbę pytań. Maszyna jest wyposażona w zestaw programów skojarzonych z tymi pytaniami i po otrzymaniu zapytania przerywa pracę drugoplanową, opracowuje odpowiedź, którą natychmiast przekazuje do właściwej konsoli, po czym wraca do programu drugoplanowego.

System konwersacyjny jest to system, w którym maszyna dzieli czas między pewną ograniczoną liczbę użytkowników, mających do niej bezpośredni dostęp. W zasadzie użytkownicy mają do dyspozycji jeden język konwersacyjny kompilujący rozkazy po kolei. Konsole są zwykle wyposażone w urządzenia wizualne, mogące w każdej chwili odwzorować zawartość fragmentu pamięci. Użytkownicy mają możność jednoczesnego korzystania z maszyny przy podziale czasu.

System uniwersalny łączy wszystkie możliwości poprzednich systemów i jest systemem najbardziej rozbudowanym. Zwykle jest on ponadto wyposażony w olbrzymie pamięci zarówno o dostępie dowolnym (dyski), jak i sekwencyjnym (taśmy). Przykładem takiego systemu jest tzw. Project-MAC w Massachusetts Institute of Technology.

Ze względu na „systemowość” maszyny muszą wykazywać następujące własności:

1) dużą niezawodność (wymagany czas między uszkodzeniami — powyżej 10 000 h);

2) szybkość powyżej kilkuset tys. operacji na 1 sek;

3) odpowiednią pojemność pamięci (pamięć wewnętrzną większą niż 64 000 słów, rozbudowaną pamięć masową);

4) wyposażenie w rozbudowany system przesyłania danych;

5) wyposażenie w rozbudowany zestaw urządzeń peryferyjnych, w szczególności urządzeń do bezpośredniej komunikacji człowiek—maszyna oraz w wideograf z piórem świetlnym;

6) strukturę umożliwiającą pracę wieloprogramową z podziałem czasu, wielodostępną;

7) wyposażenie w rozbudowane systemy operacyjne;

8) bogate oprogramowanie użytkowe.

*

Obecnie można stwierdzić występowanie dwóch tendencji w rozwoju maszyn:

1) budowa olbrzymich zespołów czy też gigantycznych maszyn — wielodostępnych i z siecią zdalnych urządzeń końcowych;

2) budowa maszyn indywidualnych — stosunkowo małych dla poszczególnych użytkowników czy też nawet dla konkretnego zadania.

Dzisiaj jeszcze ze względu na brak naprawdę wielkoseryjnej produkcji maszyn cyfrowych obie powyższe tendencje nie zarysowują się z całą ostrością, ale różne dyskusje, które pojawiają się w prasie fachowej tu i tam, pozwalają mniemać, że czas produkcji wielkoseryjnej już się zbliża.

Tabela 2

Porównanie kosztu jednej operacji w maszynach cyfrowych różnych wielkości

Maszyna	Cena (w dol.)	Szybkość dodawań na 1 sek.	Liczba operacji za 1 dol. na 1 sek.
CDC 7600	8 318 000	36,6 mln	4 400
ICL 4/70	1 000 000	600 tys.	600
Sharp-Micro-QT-8D	200	0,2	0,001

Realizacja zarówno jednej, jak i drugiej koncepcji wymaga spełnienia pewnych warunków. Aby można było zrealizować wariant pierwszy, potrzeba maszyn bardzo szybkich i o bardzo rozbudowanych pamięciach, rozległych sieci komunikacyjnych do przekazywania informacji, dogodnych urządzeń abonenckich, standaryzacji języków i sposobu użytkowania maszyn (powstawanie ciągle nowych struktur maszyn i nowych maszyn „językowych" w pewnym stopniu hamuje ich rozwój), budowy bardzo rozbudowanych systemów operacyjnych. W przyszłościowych systemach tego typu każde zadanie będzie zawierało na wstępie informacje co do sposobu zapisania zadania, języka, w którym jest ono podane itp. Informacja ta albo pozwoli na translacje zadania do języka wewnętrznego systemu, albo spowoduje przeorganizowanie systemu. Będzie zatem możliwa dynamiczna zmiana struktury systemu lub części systemu tak, aby mógł on wykonać to zadanie.

Zrealizowanie wariantu drugiego, tj. budowy maszyn indywidualnych, wymaga produkcji wielkoseryjnej, a więc taniej, i taniego oraz bardzo niezawodnego produktu, przy czym nie wydaje się, aby ze względu na bardzo mocno upakowaną budowę urządzenia mógł on być naprawiony. Przez produkt tani należy tu rozumieć taki produkt, którego cena będzie równoważna cenie sprzętu zmechanizowanego w gospodarstwie domowym.

Z porównania kosztu operacji dla maszyn różnych wielkości wynika, że koszt ten jest tym mniejszy, im maszyna jest większa i szybsza (tab. 2). Oczywiście dane zawarte w tabeli 2 mają charakter jedynie orientacyjny, gdyż nie uwzględniają wielu czynników. W każdym razie widać, że bardzo duże i szybkie maszyny są tańsze. (Sharp Micro QT-8D jest najmniejszym arytmometrem na świecie zbudowanym na układach scalonych).

*

Maszyny generacji wcześniejszych preferowały zwykłe obliczenia, maszyny dzisiejsze preferują obliczenia związane z przetwarzaniem danych i systemowością. Maszyny następnych generacji będą wykazywały cechy, które pozwolą dalej rozwijać obecny kierunek systemowy, uwzględniając jednocześnie takie zagadnienia, jak problemy komunikacji międzysystemowej, problemy wielkich banków informacyjnych i możliwości budowy wielkich sieci informacyjnych ogólnego zastosowania.

Na zakończenie można podać własności, które — jak się wydaje — będą występować u maszyn przyszłych generacji:

1. Systemy operacyjne i zarządzające będą realizowane w sprzęcie. Powszechne stosowanie programów sterowania będzie albo zredukowane, albo całkowicie wyeliminowane.
2. Większość przetwarzania będzie wykonywana na bieżąco.
3. Sprzęt i oprogramowanie będą budowane modułowo. Będzie można modyfikować moc obliczeniową bez przeprojektowywania systemu.
4. Systemy nie będą się starzały. Systemy będą tak projektowane, aby można było wymieniać ich części składowe.
5. Większość danych będzie pobierana bezpośrednio przy źródle — karty i dziurkarki będą wejściem drugorzędnym.
6. Nowe oprogramowanie będzie prostsze z punktu widzenia użytkownika, natomiast bardziej skomplikowane od strony funkcjonalnej, tj dla producenta.

Realizacja tych cech w maszynach przybliża do nas Wiek Informacji, wiek, w którym maszyna cyfrowa staje się jego pierwszym produktem.

Bibliografia

1. Tampkins C. B., Wakelin I. H.: High-Speed Computing. New York 1950, McGraw-Hill.
2. Lukoff N.: Were early Giant Computers a Success? „Datamation" 1969, ss. 77—82.
3. Mc Langhlin R. A.: The CDC 7600. „Datamation" 1969, ss. 61—64.
4. Dimmerstein L. J.: The CDC 7600-A Giant in our Time. „Data Processing" 1969, ss. 48—59.

Современная вычислительная машина

Р. Марчински

Автор статьи дает обзор мировых достижений в развитии вычислительных машин. Он описывает тоже машину ЦДЦ-7600 — самую быстродействующую из всех известных в настоящее время в мире. В статье излагаются важнейшие идеи, существенным образом повлиявшие на конструкцию вычислительных машин и дается характеристика предположительных качеств, которыми будут отличаться вычислительные машины в семидесятых годах.

The Digital Computer Today

by *R. Marczyński*

The author makes a review of the present world achievements in developing digital computers. The CDC 7600 machine, the fastest produced in the world today, is also described. He discusses the most important ideas which influenced the construction of the presently existing computers and the forecasted characteristic features of the digital computers of the 1970's.